УДК 621-926

МОДЕЛЮВАННЯ АВТОНОМНИХ ІНВЕРТОРІВ НАПРУГИ ДЖЕРЕЛ ЖИВЛЕННЯ ОДНОФАЗНИХ АСИНХРОННИХ ПРИВОДІВ

БОРОДАЙ В.А. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електропривода Національного ТУ „Дніпровська політехніка”, Дніпро, Україна, e-mail: borodai.v.a@nmu.one;

НЕСТЕРОВА О.Ю. канд. педагог. наук, доцент, завідувач кафедри філософії та педагогіки Національного ТУ „Дніпровська політехніка”, Дніпро, Україна, e-mail: nesterova.o.yu@nmu.one.

БОРОВИК Р.О. інженер, старший викладач кафедри електропривода Національного ТУ „Дніпровська політехніка”, Дніпро, Україна, e-mail: borovyk.r.o@nmu.one;

ФЕДОРОВ С.І. інженер, старший викладач кафедри електротехніки Національного ТУ „Дніпровська політехніка”, Дніпро, Україна, e-mail: fedorov.s.i@nmu.one;

Мета роботи. *Розробка оригінальних моделей інверторів напруги адаптованих до управління однофазним асинхронним двигуном із подальшою перспективою побудови автоматичних систем підвищення енергоефективності побутових механізмів, а також розробки навчальних комплексів вивчення роботи перетворювачів частоти для формування навичок з їх ремонту та налагодження.*

Методи досліджень. *Для проведення досліджень використані положення теорії електричних машин, методи синтезу цифрових систем керування, способи та методи моделювання у САПР електронна лабораторія компанії NATIONAL INSTRUMENTS складової Multisim, методи схемотехнічного проектування.*

Отримані результати. *Розроблено та побудовано моделі розподільників імпульсів для випадків живлення однофазних асинхронних двигунів з мостовими роздільно-індивідуальними інверторами пускової та робочої обмоток, напівмостових інверторів із двополярним джерелом живленням та трифазного інвертора із керуванням за 180 градусною діаграмою управління. Отримано часові діаграми наочного підтвердження працездатності системи за задекларованими принципами.*

Наукова новизна. *Запропоновано ряд оригінальних діаграм перемикання ключів силової ланки моделей розподільників імпульсів автономних інверторів напруги із врахуванням фазового зсуву та тривалості пауз перемикання плечей силового блоку задля уникнення аварійних режимів, надано рекомендації щодо рівнів частот генерації, які подаються на вхід комбінаційних схем, показано перспективу використання даної системи у складі однофазного асинхронного електропривода із можливістю енергоефективного керування.*

Практична цінність. *Запропоновані оригінальні модельні рішення автономних інверторів напруги, які адаптовані до сумісної роботи із однофазним АД, можуть бути корисними для розробників перетворювальної техніки та стати наочним матеріалом для застосування їх у навчальному процесі із підготовки фахівців спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».*

Ключові слова: моделювання, автономний інвертор напруги, топологія силової частини, розподільники імпульсів, однофазний асинхронний двигун.

ВСТУП

Відомо, що сучасні домогосподарства мають досить значний парк побутового електромеханічного обладнання. Головним його приводом у більшості є однофазний нерегульований асинхронний двигун, який переважно використовується без засобів ефективного електроспоживання. Зважаючи на регулярне зростання вартості вторинних енергоресурсів, для власників обладнання має сенс залучати системи електропривода із комплексним підходом до забезпечення енергозбереження. Хоча слід підкреслити, що при використанні однофазних асинхронних двигунів (АД) виникають особливості, які дещо відрізняються від роботи трифазних машин. Крім того, досвід розробок такого типу [1]-[3] свідчить про нераціональність залучення промислових перетворювачів частоти через їх значну вартість.

Завдання розробки моделей інверторів напруги для однофазних систем асинхронного електропривода одночасно можуть бути задіяні у навчальному процесі як засіб наочної демонстрації електромагнітних процесів та виконання практичних завдань з приводу вивчення принципів роботи, схемних рішень та методів їх наладки.

АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

Загально відомі способи фазового та амплітудного регулювання [4], [5] швидкості обертання вихідного валу однофазних асинхронних електричних мікромашин є морально застарілими і характеризуються енерговитратними наслідками управління, що проявляється у вигляді зміни симетричного магнітного поля

© Бородай В.А., Нестерова О.Ю., Боровик Р.О., Федоров С.І., 2023
DOI 10.15588/1607-6761-2023-2-2

номінального режиму на поле не симетричне протягом регулювання.

Технічне рішення [6] щодо живлення допоміжних трифазних АД від трифазного автономного інвертора напруги (АІН) із регулюванням продуктивності двигунів-вентиляторів, а також формування їх перехідних режимів дозволяє досягти високого використання систем такого типу. За очевидної переваги все одно дана система мало придатна для використання у складі асинхронних приводів із однофазними електродвигунами.

Інвертор потужності 1 кВт [7], що моделюється з синусоїдальною формою вихідної напруги, призначений для подачі змінного струму стандартної частоти 50 Гц в локально-незалежну мережу від фотоелектричного елемента. Одночасно він дозволяє подавляти гармоніки, що знижує гармонійні спотворення і відповідно підвищує якість електроенергії. Наявні переваги не гарантують якісної роботи активно-індуктивного навантаження. Тому систему такого типу потрібно додатково дослідити на цей предмет.

В джерелі [8] розглядається однофазна асинхронна машина, яка є головним споживачем електроенергії у побутових умовах. Наявність у схемі двигуна фазо-зсувних конденсаторів демонструє значний рівень пульсацій крутного моменту протягом запуску та сталого режиму, що викликає вібрації та шум у машині. У рамках стратегії пом'якшення такої проблеми розроблена та досліджена модель привода із двофазним інвертором з розімкнутим контуром для зменшення небажаних пульсацій. Результати моделювання демонструють досягнення бажаного результату, хоча запропонована система утруднює регулювання швидкості.

В публікації [9] пропонується скористатися репрезентативним контролером VGPI для управління швидкістю приводу асинхронного двигуна із короткозамкненим ротором (SCIM) з широтно-імпульсною модуляцією для подолання небажаного пікового перевищення динамічного відстеження швидкості або збурення крутного моменту навантаження. Система, яка пропонується, має ускладнену конструкцію, що може стати причиною досить коштовного кінцевого виробу і не прийнятною для споживача через зменшення конкурентних якостей.

Робочий період електронного комутатора [10], який керує послідовно увімкненими конденсаторами з пусковою обмоткою АД, регулюється так, аби отримати оптимальні значення ємності конденсатора за умови забезпечення максимального крутного моменту двигуна. Моделювання системи протягом дії змінного навантаження у перехідних та сталих режимах підтверджує очікувану якість роботи електричної машини. З точки зору енергоефективності даний спосіб є недосконалим хоча і досить простий у реалізації.

Моделювання однофазної системи засобами Matlab [11] передбачає конструкцію, до складу якої входять: джерело постійного струму напруги 300 В, інвертор PWM, LC-фільтр і активне навантаження. Результат досліджень демонструє стабільну роботу перетворювальної системи на активне навантаження. Проте, як система буде себе поводити на активно-реактивне навантаження невідомо.

В [12] розглянуто спосіб економічно ефективного регулювання швидкості АД. Поставлене завдання досягається раціональним регулюванням фази і рівня струму пускової обмотки за номінальної напруги в робочій обмотці. Спосіб дає деяке підвищення ефективності але результат є недостатнім.

Проект [13] призначений для регулювання швидкості однофазного асинхронного двигуна за допомогою простої системи управління, яку зазвичай використовують у побутовій механізації. Запропонована система дає гнучку можливість регулювання продуктивності механізму на власний розсуд некваліфікованого користувача, що нечасто дозволяє здійснювати регулювання за раціональним способом споживанням електричної енергії.

Векторно-алгоритмічне управління однофазно-трифазного реверсивного комутатора [14], веденого мережею, передбачає подачу однофазної змінної напруги в статорні обмотки шляхом комутації силових ключів. Це утворює в них обертове магнітне поле. За таких умов запуск трифазних АД від однофазної мережі і навантажені не більше 70 % номінального у багатьох випадках задовольняє бажаним умовам експлуатації. При усьому цьому така система забезпечує регулювання швидкості із деякими обмеженнями.

Схемне рішення [15], [16] трифазно-однофазного асинхронного електроприводу з триелементним фазозміщуючим модулем дозволяє отримати симетричний режим у широкому діапазоні зміни навантажень. Головним недоліком системи є ступеневе регулювання, що не завжди може бути задіяно для механізмів, де вимагається значний діапазон зміни пріоритетної координати керування.

Запропонований перелік технічних рішень у випадку плавного регулювання координат однофазних АД з короткозамкненим ротором мало придатний для використання. На погляд авторів, для таких випадків є сенс скористатися системами із частотним управлінням та способами енергоощадної експлуатації.

МЕТА РОБОТИ

Розробка оригінальних моделей інверторів напруги, адаптованих до управління однофазним асинхронним двигуном із подальшою перспективою побудови автоматичних систем підвищення енергоефективності побутових механізмів, а також розробки навчальних комплексів вивчення роботи перетворювачів частоти для формування навичок з їх ремонту та налагодження.

ВИКЛАД ГОЛОВНОГО МАТЕРІАЛУ Й АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Конструкційна особливість однофазних АД передбачає наявність у їх складі робочої та пускової обмоток, які геометрично розташовують під кутом 90 градусів на статорі електричної машини. При цьому їх живлення повинно здійснюватися напругою з фазовим зсувом в 90 електричних градусів. Виконання таких умов диктується необхідністю утворення обертового симетричного магнітного поля статора, що закладено у принцип роботи асинхронного електричного двигуна.

Натепер існує декілька версій конструкцій АД. Найпоширеніша у побутових приладах має конструкцію з однаковими пусковою та робочою обмотками, де остання вмикається в електричну мережу через фазо-зсувну ємність (так звані конденсаторні АД). Можуть зустрічатися конструкції машин, які передбачають вмикання пускової обмотки тільки на час запуску. По його завершенню більш «слабка» пускова обмотка вимикається, що сприяє утворенню пульсуючого магнітного поля статора. Відповідно, за такого вмикання машини дещо втрачається потужність. Існують конструкції малопотужних АД із розщепленими полюсами та наявністю на них коротко замкненого витка. Такі машини мають високу перевантажувальну здатність, але не дозволяють виконувати реверсування. Таким чином, для отримання найкращих технічних показників АД у побутових пристроях із необхідністю регулювання та реверсування машини краще використовувати конструкцію із однаковими характеристиками, як робочої, так і пускової обмоток.

Для пріоритетної версії АД отримати ефективне керування можливо навіть за відсутності спеціальної фазо-зсувної ланки. Для цього потрібно використання спеціального силового електронного перетворювача із відповідною схемою розподільника імпульсів комутації транзисторів. Авторами публікації пропонується три топології реалізації автономного інвертора, які будуються на силовій ланці з однофазним мостовим роздільно-індивідуальним, напівмостовим і джерелом подвійного живлення та трифазної мостової системи перетворення із керуванням за 180° діаграмою.

Почнемо розгляд запропонованих версій автономних інверторів із топології однофазної мостової роздільної схеми. Для її реалізації використана принципова схема силової частини рис.1 та розроблена таблиця перемикання ключів (табл.1) .

№ п.п.	x3	x2	x1	x0	T1	T2	T3	T4	T1'	T2'	T3'	T4'
0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	1
1	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
2	0	0	1	0	0	1	0	1	1	1	0	0
3	0	0	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1
4	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1
5	0	1	0	1	1	1	0	0	0	1	0	1
6	0	1	1	0	1	0	1	0	0	1	0	1
7	0	1	1	1	1	0	1	0	1	1	0	0
8	1	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1
9	1	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	1

Таблиця 1.
Діаграма перемикань ключів.

x0…x3 - вхідний параметр, T1…T4 і T1'…T4' - номер ключа

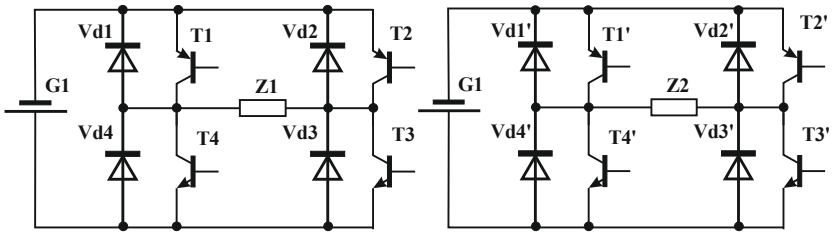
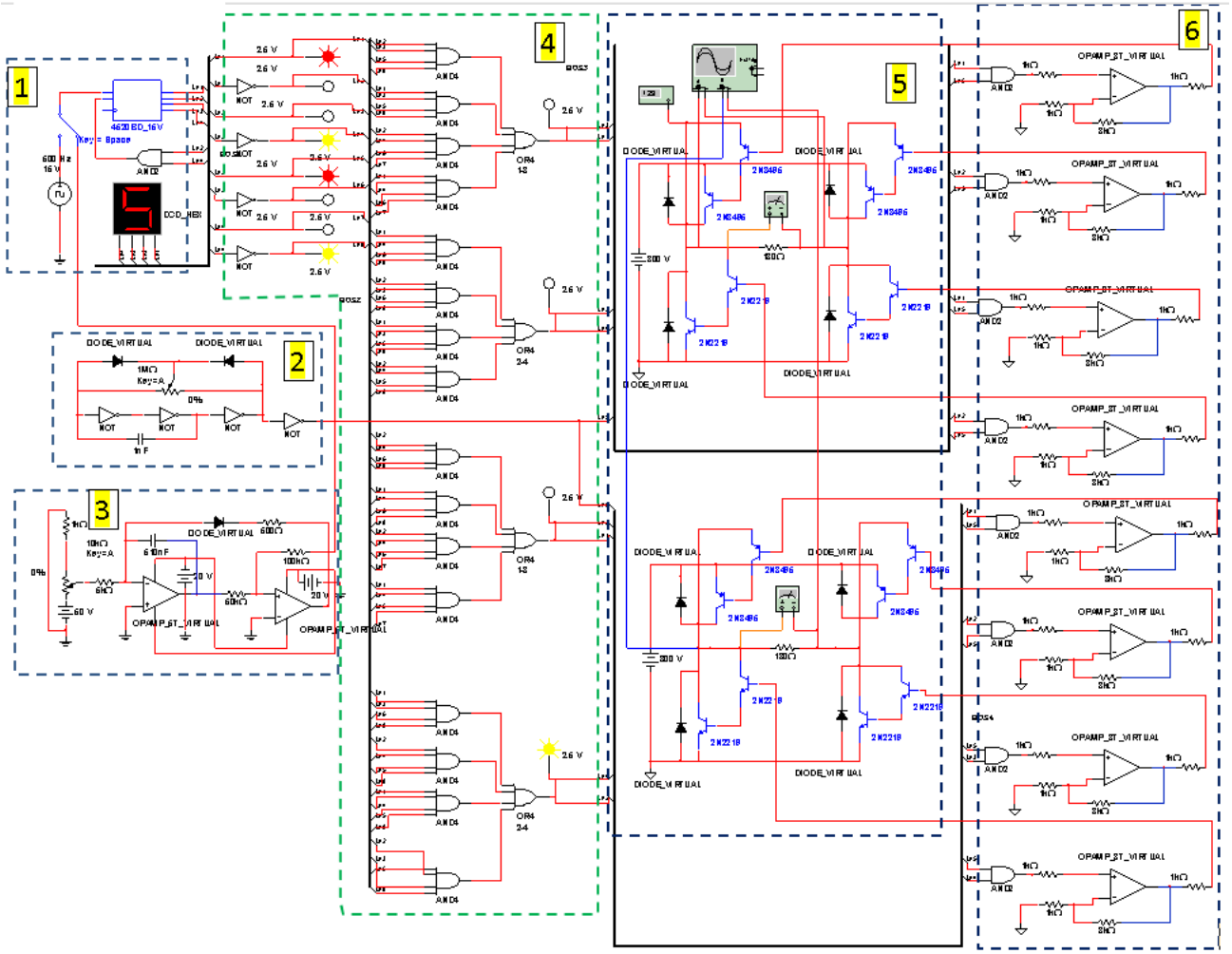
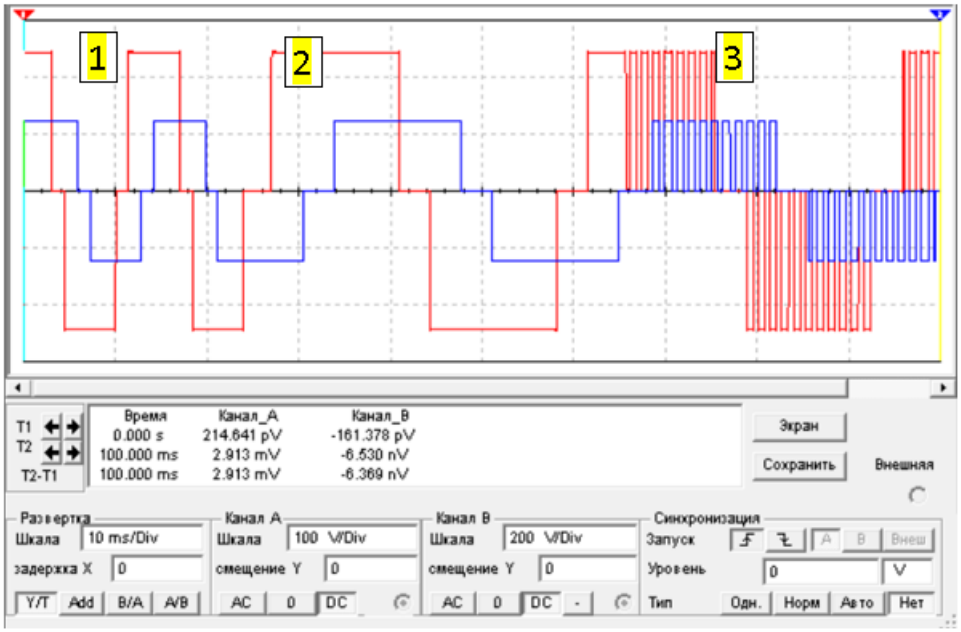


Рисунок 1. Силова ланка роздільного однофазного живлення, де Z1, Z2 робоча і пускова обмотки

Для такого схемного рішення живлення інверторів здійснюється від одного джерела G1. Кожен ключ охоплено зворотнім діодом із метою уникнути виникнення аварійних режимів. Для запропонованих схем (рис.1) і діаграми перемикання ключів (табл.1) побудована модель (рис.2, а) засобами електронної лабораторії Multisim. До складу системи входять (рис.2, а): 1 – лічильник вхідних сигналів; 2 – генератор регульованої шпаруватості; 3 – перетворювач напруга-частота; 4 – розподільник імпульсів; 5 – силова ланка перетворення; 6 – підсилювачі узгодження потужності. Результати моделювання зміни напруги пропонується переглянути на рис.2, б). Запропонований автономний інвертор напруги спроможний здійснювати регулювання за двома зонами. Тобто за напругою та частотою одночасно, при цьому автоматично підтримується фазовий зсув між напругами на робочій та пусковій обмотках, за принципом роботи, який вимагається однофазним АД. Перетворювач має можливість регулювання напруги від 0 до 220 В (рис. 2, б, 3) і частоти від 0 до 72 Гц (рис.2, б, 1,2). За досить стабільної та безвідмовної роботи така схема має велику



а)



Напруга на робочій обмотці, Канал А, масштаб 100 В / Діл;

Напруга на пусковій обмотці, канал В, масштаб 200 В / Діл.

1 – частота 72 Гц;

2 – частота 31 Гц;

3 – частота 31 Гц із зниженою напругою.

б)

Рисунок 2. Модель та результат досліджень схеми роздільно-незалежних інверторів

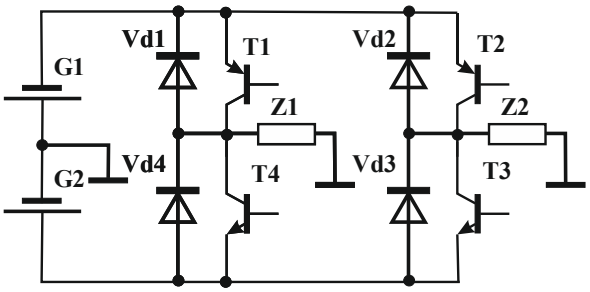
кількість елементів ланки перетворення, що робить її мало конкурентною.

Наступний варіант схемного рішення – роздільне живлення з напівмостовими силовими схемами і подвійними схемами джерел живлення (рис.3, б).

Розроблена модель та результати її випробувань демонструються на рис.4.

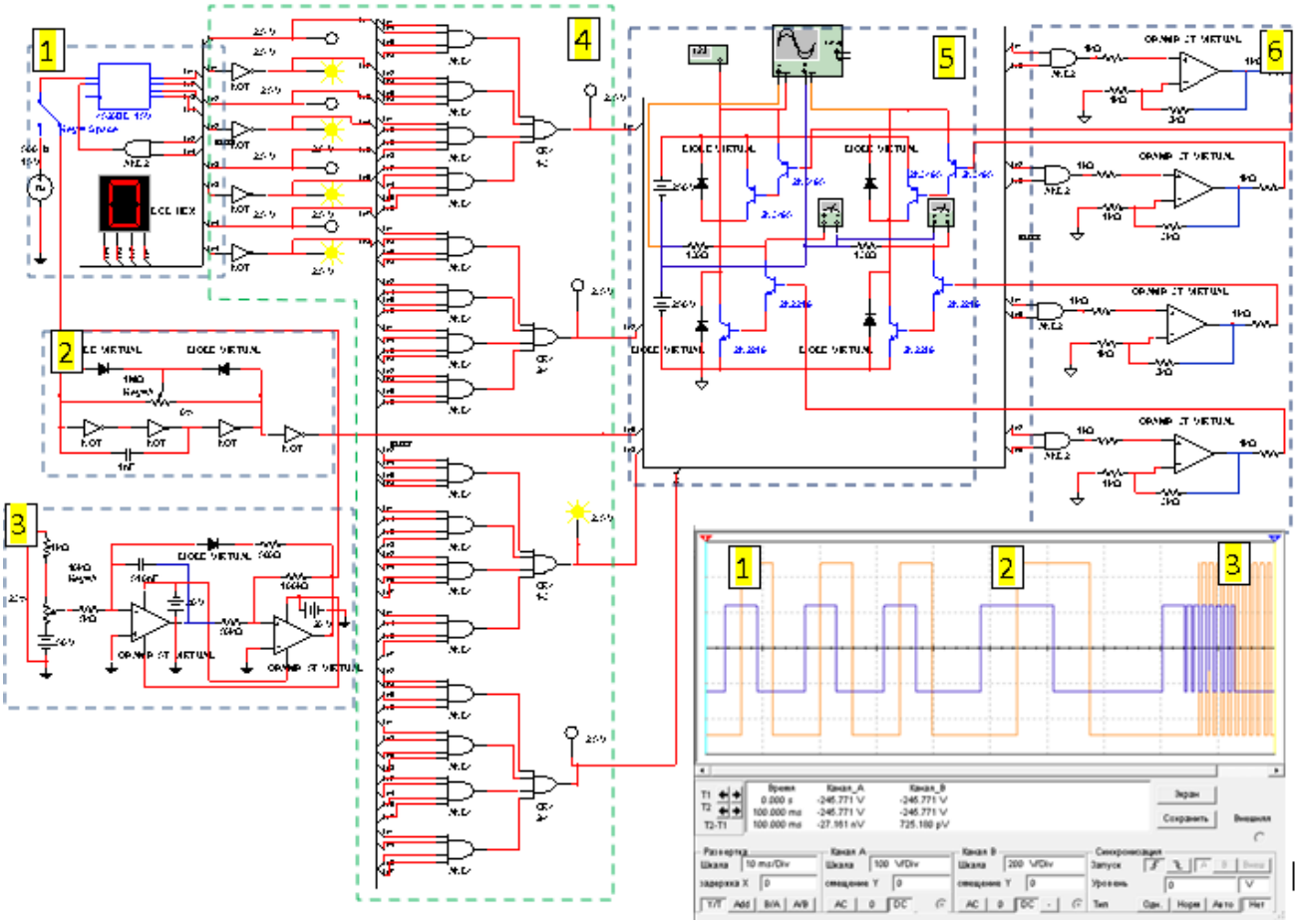
№ п.	x3	x2	x1	x0	T1	T2	T3	T4
0	0	0	0	0	0	0	1	0
1	0	0	0	1	1	0	1	0
2	0	0	1	0	1	0	0	0
3	0	0	1	1	1	1	0	0
4	0	1	0	0	1	1	0	0
5	0	1	0	1	0	1	0	0
6	0	1	1	0	0	1	0	1
7	0	1	1	1	0	0	0	1
8	1	0	0	0	0	0	1	1
9	1	0	0	1	0	0	1	1

а)



б)

Рисунок 3. Вхідна роздільна напівмостова реалізація, де а – діаграма перемикань, б – схема ланки перетворення із подвійним живленням



а) б)

робоча, канал А, масштаб 100 В / Діл, пускова обмотки, канал В, масштаб 200 В / Діл.; 1 – частота 72 Гц; 2 – частота 31 Гц; 3 – частота 31 Гц із зниженою напругою.

Рисунок 4. Модель та результати досліджень системи з подвійним джерелом живлення

Раціональність системи з точки зору мінімуму елементів очевидна. Характеристики роботи аналогічні попередній схемі. На жаль, наявність двох джерел живлення не завжди може бути застосована.

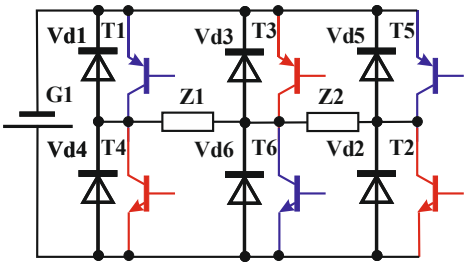
Найбільш раціональною, на думку авторів, є схема трифазної мостової реалізації із діаграмою керування за 180° градусним вмиканням ключів (рис.5), яка передбачає одночасну роботу трьох транзисторів. Власне, такий спосіб управління дозволяє отримати роботу інвертора із усіма перевагами, що притаманні двом попереднім схемним реалізаціям.

Важливим моментом проектування розподільників імпульсів є встановлення бажаної частоти тактових імпульсів, що подаються на вхід лічильника задання початкових керуючих сигналів. Зважаючи на те, що бажана максимальна частота перетворення повинна коливатися у межах 0…50 Гц, а перші дві діаграми потребують максимального модуля рахунку 10, то у цьому випадку тактова частота генератора імпульсів керування повинна бути не менше 500 Гц. У випадку схеми рис.5, б) тактова частота для отримання бажаної частоти на виході перетворювача повинна становити не менше 300 Гц.

Модель та результати випробувань схеми рис.5, б) мають вигляд зображений на рис.6, 7. Форми отриманих напруг (рис.7) теж задовольняють принципу роботи однофазної асинхронної машини. При цьому ця схема має раціональну кількість елементів та відносну простоту способу керування.

№ п	x2	x1	x0	T1	T2	T3	T4	T5	T6
0	0	0	0	1	0	0	0	1	1
1	0	0	1	1	1	0	0	0	1
2	0	1	0	1	1	1	0	0	0
3	0	1	1	0	1	1	1	0	0
4	1	0	0	0	0	1	1	1	0
5	1	0	1	0	0	0	1	1	1

а)



б)

Рисунок 5. Вхідна трифазна мостова схема перетворення, де а – діаграма, б – схема силової ланки

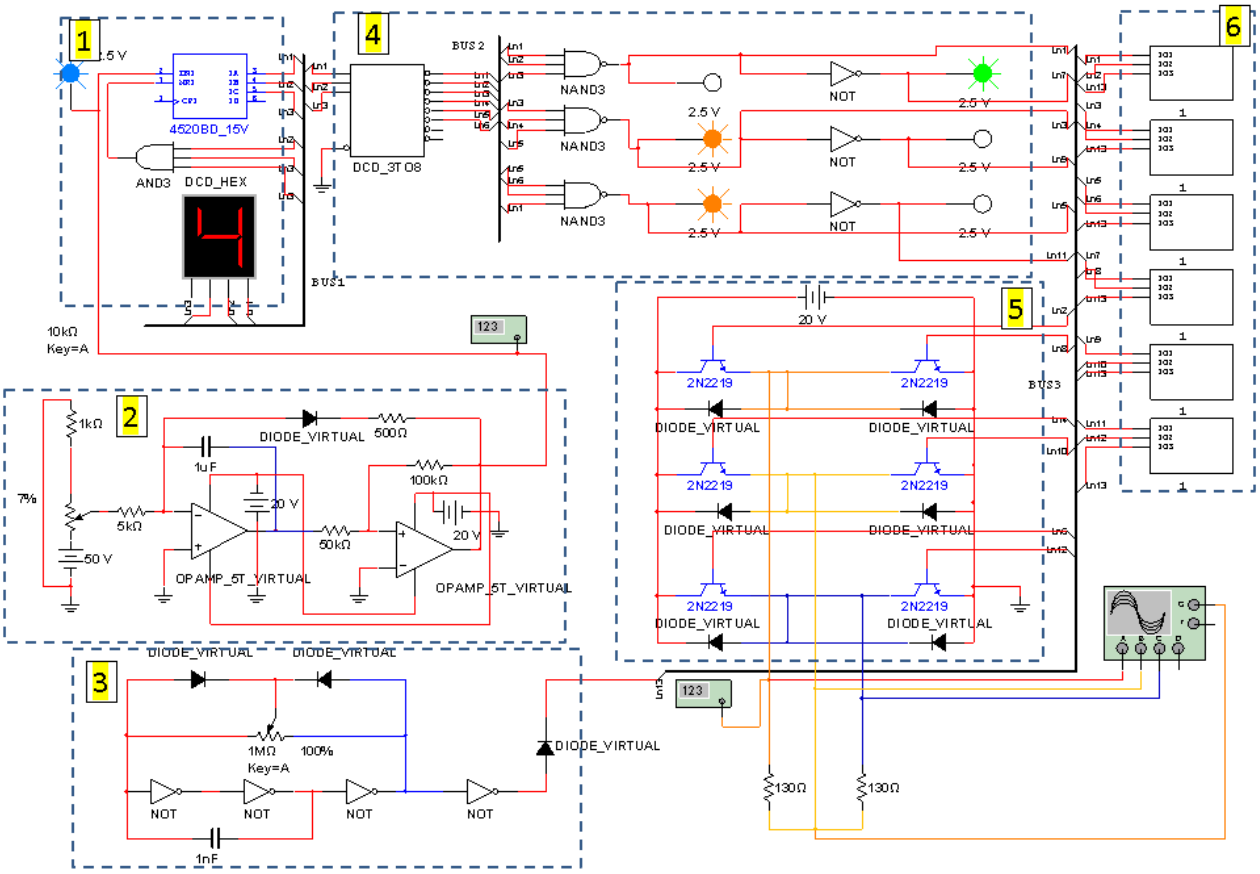
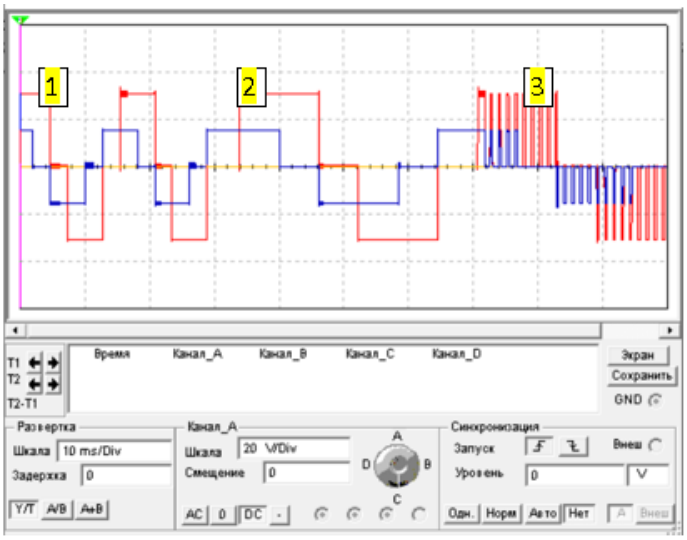


Рисунок 6. Трифазна мостова реалізація моделі



Напруга на робочій обмотці, канал А, масштаб 10 В / Діл;

Напруга на пусковій обмотці, канал В, масштаб 20 В / Діл.

1 – частота 72 Гц;

2 – частота 31 Гц;

3 – частота 31 Гц із зниженою напругою.

Рисунок 7. Результати моделювання

ВИСНОВКИ

Аналіз запропонованого ряду топологій систем автономних перетворювачів напруги та частоти для однофазних асинхронних двигунів дозволяє зробити наступні висновки:

- Роздільна система живлення, побудована на двох окремих інверторах, дає добрий результат управління однофазним АД але за наявності надлишкової кількості елементів силового блоку, що ускладнює систему керування з одного боку, а з іншого, – стає підставою для зростання її вартості;
- Роздільна система, яка будується на напівмостових схемах силової ланки, має переваги по відношенню до попередньої реалізації, хоча у цьому випадку є потреба живлення від джерела подвійного типу;
- Трифазна система є найбільш раціональною з точки зору кількісного складу елементного вмісту схеми, універсальності способу керування для однофазної і трифазної асинхронної машини, що дозволяє уніфікувати такі інвертори на усі можливі випадки використання;
- Проведений аналіз різних топологій використання силових ланок автономних інверторів може стати відправною точкою для створення методичного забезпечення вивчення курсу «Силові перетворювачі автоматизованих електроприводів».

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

[1] Бородай В.А., Ковальов О.Р. Моделювання систем імпульсно-фазового керування перетворювальних приладів // Семінар Наукової Ради з проблем «Наукові основи електроенергетики». – К. : Інститут електродинаміки, 2019. – С. 11.

[2] Бородай В.А., Ковалев А.Р. Моделирование систем импульсно-фазового управления преобразовательных устройств // Гірн. Електромеханіка та автоматика: Наук. – техн. зб. – 2015. – Вип. 94. – С. 64-69.

[3] Бородай В.А., Ковалев А.Р. Широтно-импульсный регулятор с координатно-фазовым управлением скважности // Гірн. Електромеханіка та автоматика: Наук. – техн. зб. – 2015. – Вип. 95. – С. 54–58.

[4] Електротехнічні пристрої систем автоматичного управління технологічними процесами: навч. посіб. посібник для студентів галузі знань 15 – «Автоматизація та приладобудування» спеціальності 151 – «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / В.П. Грудська, В.І. Чибеліс / КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 5 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 107 с.

[5] Осташевський М.О. Електричні машини і трансформатори: навч. посібник / М.О. Осташевський, О.Ю. Юр'єв; за ред. д-ра техн. наук, професора В.І Мілих. - Київ: Каравела, 2018. - 452 с.

[6] Berdiev U.T., Khasanov F.F.O., Kutbidinov O.M.O. Uxiliary electric drive with asynchronous motor from a three-phase autonomous voltage inverter / U.T. Berdiev, F.F.O. Khasanov, O.M.O. Kutbidinov // Materials of conference «Innovative approaches, problems, Proposals and solutions in science and education». Tashkent state transport university.

Tashkent. - 2022. - №1. - P. 50-55.

[7] Shahriar Muttalib Z.M., Ferdous S.M., Mortuza Saleque A., Chowdhury Md. M. Design and simulation of an inverter with high frequency sinusoidal pwm switching technique for harmonic reduction in a standalone / Z.M.Shahriar Muttalib, S.M. Ferdous, A.Mortuza Saleque, Md. M. Chowdhury // Utility Grid Synchronized Photovoltaic System. 2012 International Conference on Informatics, Electronics & Vision (ICIEV), Dhaka, Bangladesh. – 2012. – P. 1168-1173.
DOI: 10.1109/ICIEV.2012.63175 33

[8] Olarinoye G.A., Oricha J.Y. PWM inverter drive for modified single phase induction motors / G.A. Olarinoye, J.Y. Oricha // FUOYE Journal of Engineering and Technology, 2017. - Volume 2, Issue 2, P. 83-89.

[9] Srivastava A., Tripathi S. Current source inverter fed induction motor drives: A survey / A.Srivastava, S. Tripathi // International Journal of Electrical Systems (IJES). – 2011. – Vol. 1, No. 1, June. - P. 14-27.

[10] Sunter, S., Ozdemir, M., & Gumus, B. Modelling and simulation of single-phase induction motor with adjustable switched capacitor / S. Sunter, M. Ozdemir, B. Gumus // Proceedings of the 9th International Conference on Power Electronics and Motion Control. – 2000. - P. 5-1 – 5-5.

[11] Shneen S.W., Abdullah F.N., Shaker D.H. / S.W. Shneen, F.N. Abdullah, D.H. Shaker Simulation model of single phase PWM inverter by using MATLAB/SIMULINK // International Journal of Power Electronics and Drive Systems. – 2021. - Vol. 12, No. 1, P. 212-216.

[12] Hamid, M.B. New method for speed control of single phase induction motor with improved motor performance / M.B. Hamid // Energy Conversion and Management. – 2001. – Vol. 42. - No. 8. - P. 941-950.

[13] Darbali-Zamora R., Merced D., Díaz-Castillo A., Ortiz-Rivera E. Single phase induction motor alternate start-up and speed control method for renewable energy applications / R. Darbali-Zamora, D. Merced, A. Díaz-Castillo, E. Ortiz-Rivera // Conference: 2014 International Conference on Renewable Energy Research and Application . - 2015. – P.743-748.

[14] Halina T. et al. Modeling electromechanical characteristics of three-phase motors with inverters vector-algorithmic type in Matlab Simulink environment/ T.Halina // Procedia Eng. – 2016. - vol. 165.

[15] Шуруб Ю.В. Трифазно-однофазний асинхронний електропривод з багатоелементним ємнісним фазозміщуючим модулем / Ю.В. Шуруб // Електротехніка і електромеханіка. - 2011, №3. – С. 49-50.

[16] Шуруб Ю.В. Оптимізація трифазно-однофазних асинхронних електроприводів з ємнісними багатоелементними фазозміщуючими модулями змінної структури / Ю.В. Шуруб // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб.наук.пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2008. Вип. 20. – С. 39-40.

Стаття надійшла до редакції 07.09.2023

SIMULATION OF AUTONOMOUS VOLTAGE INVERTERS OF POWER SOURCES OF SINGLE-PHASE ASYNCHRONOUS DRIVES

BORODAI V.A. Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electric Drive, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine, e-mail: borodai.v.a@nmu.one;

NESTEROVA O.YU. PhD, Associate Professor of, Head of the Department of Philosophy and Pedagogy, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine, e-mail: nesterova.o.yu@nmu.one.

BOROVYK R.O. Engineer, Senior Lecturer of the Department of Electric Drive, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine, e-mail: borovyk.r.o@nmu.one;

FEDOROV S.I. Engineer, Senior Lecturer of the Department of Electrical Engineering, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine, e-mail: fedorov.s.i@nmu.one;

Purpose. *Development of original models of voltage inverters adapted to control a single-phase asynchronous motor with the subsequent prospect of creating automatic systems for improving the energy efficiency of household mechanisms, as well as developing educational complexes for studying the operation of frequency converters to form skills for their repair and tuning.*

Methodology. *The provisions of the theory of electric machines, methods of synthesis of digital control systems, methods and methods of modeling in CAD electronic laboratory of the company NATIONAL INSTRUMENTS of the Multisim component, methods of circuit design were used for conducting research.*

Findings. *Models of pulse distributors were developed and built for the cases of power supply of single-phase asynchronous motors with bridge inverters of separate and individual starting and working windings, half-bridge inverters with a bipolar power source and a three-phase inverter with control according to a 180-degree control diagram. Time diagrams of visual confirmation of the system's performance according to the declared principles have been obtained.*

Originality. *A number of original switch diagrams of the power section of the models of impulse distributors of autonomous voltage inverters are proposed, taking into account the phase shift and the duration of the switching pauses of the switching arms of the power unit to avoid emergency modes, recommendations are given on the levels of generation frequencies that are fed to the input of the combinational circuit, the prospect of using this system as part of a single-phase asynchronous electric drive with the possibility of energy-efficient control is shown.*

Practical value. *The proposed original model solutions for autonomous voltage inverters, which are adapted to work together with a single-phase IM, can be useful for developers of converter technology and become visual material for their use in the educational process for training specialists in specialty 141 "Electric power engineering, electrical engineering and electromechanics".*

Keywords: simulation, autonomous voltage inverter, topology of the power section, pulse distributor, single-phase asynchronous motor.

REFERENCES

[1] Borodai, V.A., Kovalev, O.R. (2019). Modeljuvannja system impul'sno-fazovogo ke-ruvannja peretvorjuval'nyh pryladiv [Modeling of pulse-phase control systems of converting devices]. Seminar of the Scientific Council on the problems "Scientific foundations of electric power engineering, Institute of Electrodynamics, 11. (in Ukrainian).

[2] Borodai, V.A., Kovalev, O.R. (2015). Modelirovanie sistem impul'sno-fazovogo upravlenija preobrazovatel'nyh ustrojstv [Modeling of systems of pulse-phase control of converting devices]. Hirn. Electromechanics and automation, 94, 64-69. (in Ukrainian).

[3] Borodai, V.A., Kovalev, O.R. (2015). Shirotno-impul'snyj reguljator s koordinat-no-fazovym upravleniem skvazhnosti [Pulse-width controller with coordinate-phase duty cycle control]. Hirn. Electromechanics and automation, 95, 54-58. (in Ukrainian).

[4] Grudska, V.P., Chibelis, V.I. (2021). Elektrotehnichni prystroi' system avtomatychnogo upravlinnja tehnologichnymy procesamy: navch. posib. posibnyk dlja studentiv galuzi znan' 15 – «Avtomatyzacija ta pryladobuduvannja» special'nosti 151 – «Avtomatyzacija ta komp'juterno-integrovani tehnologii'» [Electrotechnical devices of systems of automatic control of technological processes: training. manual a guide for students of the field of knowledge 15 - "Automation and instrument engineering" specialty 151 - "Automation and computer-integrated technologies"]. Kyiv, KPI named after Igor Sikorsky, 107. (in Ukrainian).

[5] Ostashevs'kyj, M.O., O.Ju., Jur'jev (2018). Elektrychni mashyny i transformatory: navch. Posibnyk [Electric machines and transformers: training. Manual]. Kyiv, Caravela, 452. (in Ukrainian).

[6] Berdiev, U. T., Khasanov, F. F., Kutbidinov, O. M. (2022). Vspomogatel'nyj jelektroprivod s asinhronnym dvigatelem ot trehfaznogo avtonomnogo preobrazovatelja naprjazhenija [Auxiliary electric drive with an asynchronous motor from a three-phase autonomous voltage converter]. GIAB. 1. URL: https://cyberleninka.ru/ article/n/auxiliary-electric-drive-with-asynchronous-motor-from-a-three-phase-autonomous-voltage-inverter (date of the application: 23.07.2023). (in Uzbekistan).

[7] Shahriar, Z.M., Muttalib, S. M., Ferdous, Mortuza, A., Saleque and Md. M. Chowdhury (2012). "Design and Simulation of an Inverter with High Frequency Sinusoidal PWM Switching Technique for Harmonic Reduction in a Standalone / Utility Grid Synchronized Photovoltaic System". Int. Conf. Inf. Electronics & Vision. 1168-1173, 2012. DOI: 10.1109/ ICIEV.2012.63175 33

[8] Olarinoye, Gbenga & Oricha, Joseph. (2017). PWM Inverter Drive for Modified Single Phase Induction Motors. FUOYE Journal of Engineering and Technology. 2. 10.46792 / fuoyejet.v2i2.147.

[9] K. Srivastava, S. M. Tripathi "Current Source Inverter fed Induction Motor Drives: A Survey" International Journal of Electrical Systems (IJES).

[10] Sunter, Sedat & Ozdemir, Mehmet & Gumus, Bilal. (2000). Modeling and Simulation of A Single Phase Induction Motor with Adjustable Switched Capacitor. 5-1.

[11] Shneen, Salam & Abdullah, Nabeel & Harith, Dina. (2020). Simulation Model of Single Phase PWM Inby using Matlab. International Journal of Power Electronics and Drive Systems. Vol. 12, No. 1, Mar 2021, pp. 212-216.

[12] Hamid, M.B. (2001). New method for speed control of single phase induction motor with improved motor performance . Energy Conversion and Management. - Vol. 42, No. 8, P. 941-950.

[13] Darbali-Zamora, Rachid & Merced, Daniel & Díaz-Castillo, Andrés & Ortiz-Rivera, Eduardo. (2015). Single phase induction motor alternate start-up and speed control method for renewable energy applications. Conference: 2014 International Conference on Renewable Energy Research and Application, pp. 743-748. 10.1109/ICRERA.2014.7016484.

[14] Halina, T., (2016). Modeling electromechanical characteristics of three-phase motors with inverters vector-algorithmic type in Matlab Simulink environment, Procedia Eng., vol. 165.

[15] Shurub, Yu.V. (2011). Vybor asinhronnogo dviga-

telja privoda ventiljatora teplovoza s usloviem obespechenija ego ustojchivoj raboty [Three-phase-single-phase asynchronous electric drive with a multi-element capacitive phase-shifting module]. Electrical engineering and electromechanics, 3, 49-50. (in Ukrainian).

[16] Shurub, Yu.V. (2008). Optymizacija tryfazno-odnofaznyh asynhronnyh elektropryvodiv z jemnisnymy bagatoelementny-my fazozmishhujuchymy moduljamy zminnoi' struk-tury [Optimization of three-phase-single-phase asynchronous electric drives with capacitive multi-element phase-shifting modules of variable structure] Pr. Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine, College of Science - K.: IED of the National Academy of Sciences of the National Academy of Sciences, 20, 39-40. (in Ukrainian).